Intérêt des images à très haute résolution spatiale pour évaluer le risque d'inondation

Christian Puech[a], Damien Raclot[a], Pierre Maurel[a]

Avec le développement technologique de l'imagerie satellitaire, des techniques et des outils de traitement de l'information géographique (SIG), en lien avec l'évolution des capacités informatiques, désormais, de nouvelles techniques pour l'analyse et la prévention des inondations sont disponibles et utilisables.

Nous présentons ici un aspect nouveau lié à l'apparition des données images à très haute résolution spatiale (THRS, encadré 1, *p. 84*) qui procurent des informations pertinentes pour améliorer la connaissance des zones inondées. Ces techniques ne viennent pas tout révolutionner, au point, comme le voudraient certains, de supprimer les risques d'inondation, mais elles peuvent contribuer à leur meilleure gestion. En effet, leur apport peut être important pour une connaissance rapide et plus objective du risque, en offrant un systématisme et une homogénéité de vision sur les zones inondées avec une grande précision de localisation.

Ces nouvelles techniques ne sauraient être utilisées seules, en substitution des autres données ou approches : elles doivent venir en complément de la panoplie des outils et techniques existants. D'ailleurs, des compléments de terrain sont nécessaires pour calibrer et valider l'interprétation des données spatiales elles-mêmes.

Rappelons que d'un point de vue scientifique, le risque est défini comme un croisement entre un phénomène physique (l'aléa) et une vulnérabilité directe ou indirecte des enjeux présents dans la zone (Gilard, 1998).

Les études de la vulnérabilité à partir de données de télédétection se sont limitées pour le moment à des projets opérationnels où cette technologie a été utilisée de manière très pragmatique, souvent en se contentant de bases de données existantes.

– Dans le cas du bassin de la Seine en région Île-de-France, la base de données MOS (Mode d'occupation du sol) produite par l'IAURIF (Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Île-de-France) à l'échelle du 1 : 5 000 essentiellement par télédétection a été employée pour identifier les enjeux (Debar *et al.*, 1994, Villion 1999).

– En Languedoc-Roussillon, un travail méthodologique exploratoire est en cours pour estimer à l'échelle infra-communale la population résidant en zone inondable. La base de donnée vectorielle d'occupation du sol SPOT Théma® au 1 : 25 000, dérivée d'images satellitales SPOT, a été testée en complémentarité des données de l'INSEE pour automatiser le calcul des populations concernées par une inondation dans les communes de moins de 10 000 habitants.

– Sur les vallées inondables du Rhône et de la Saône, une cartographie détaillée de l'occupation du sol a été réalisée par photo-interprétation analogique de photographies aériennes acquises pour cette étude. Il est à noter que la nomenclature de la carte a été définie spécifiquement pour une problématique d'inondation (IRS et SIEE, 2001).

Par contre, les travaux de recherche sur la caractérisation de l'occupation du sol par télédétection sont foisonnants, mais les nomenclatures et les niveaux de précision visés ne sont pas

Contact

a. UMR 3S, Cemagref ENGREF, Maison de la télédétection
500, rue JF Breton, 34093 Montpellier Cedex 5

Ingénieries N° spécial 2003 – p. 83 à 96

forcément adaptés à une problématique d'inondation, contrairement à ce qui est proposé dans la partie enjeux ci-dessous.

Les études sur la caractérisation de l'aléa sont quant à elles plus nombreuses. Initialement basées sur l'emploi des photographies aériennes, elles portent depuis quelques années sur l'ensemble de la gamme d'images satellitaires disponibles : par exemple pour la France, images SPOT et radar sur la Camargue en 1992 (SERTIT, 2000), ou sur les inondations du grand Sud en 1999 (SCOT, 2000) ou encore des données radar sur les inondations de Puisserguier (Marinelli *et al.*, 1997). Toutes ces études utilisent l'image pour délimiter la zone d'extension de la crue à l'instant du cliché et, dans de rares cas, comme conditions aux limites de la modélisation hydraulique.

Encadré 1

La THRS (Très Haute Résolution Spatiale)

Les spécificités des différents satellites se mesurent selon trois résolutions : spatiale (taille du pixel), spectrale (nombre et valeur des plages radiométriques utilisées) et temporelle (durée entre deux images successives du même lieu). On doit encore ajouter des informations de type emprise géographique au sol (surface observée) et facilité d'obtention des images (rapidité, coût, possibilité de programmation, accès aux images d'archive...). La fin des années 90 a vu l'arrivée de satellites civils pour l'observation de terre de nouvelle génération. Le changement le plus profond concerne la résolution spatiale des nouveaux produits, changement profond car les images nouvelles sont de type métrique (résolution allant de 50 cm à quelques mètres).

Les nouveaux satellites sont nombreux (Aplin, 1997) (se reporter à l'encadré 3 en fin de cet article). Citons par exemple IKONOS (USA, avec une résolution à partir de 0,8 m), SPOT 5 (France, résolution à partir de 2,5 m) ou encore IRS (Inde, à partir de 5,8 m). Le lancement d'autres satellites plus spécifiques sont prévus à court terme (par exemple, le « système Pléiades » du CNES-ESA). On place aussi dans les hautes résolutions spatiales, les photos aériennes, documents plus classiques, pour lesquels les traitements d'image sont généralement peu automatisés et de type photo-interprétation tandis que la taille minimale des objets discriminés est variable : elle dépend de l'altitude de prise de vue, du grain de l'image et du pas de scannage en cas de numérisation.

Le passage des résolutions décamétriques (satellites Landsat TM 30 m, SPOT XS 20 m) aux résolutions métriques apporte une finesse géométrique nouvelle qui améliore sensiblement la délimitation et l'identification des objets, malgré des problèmes accrus de stockage et de traitement de ces images très volumineuses.

Mais par ailleurs, ce même passage aux résolutions métriques n'est pas seulement un simple changement numérique de la résolution. On peut le voir comme une révolution dans l'image elle-même, révolution qui touche la nature de ce que l'on voit sur l'image : les types d'objets visibles, ainsi que tous les aspects du traitement et de l'utilisation des images. D'une part, la THRS apporte dans les études environnementales une vision à taille humaine : la taille du pixel est proche de celle de l'homme et des objets de son environnement habituel (véhicules, bâtiments, arbres...). D'autre part, les problèmes de déformations et les méthodes d'analyse et de traitement d'image sont complètement bouleversés et doivent être revus et repensés, ce que nous illustrerons en quelques points.

1) Désormais les pixels sont trop petits pour que la hauteur des objets correspondants puisse être négligée devant la taille du pixel. La zone couverte par le pixel ne peut plus être considérée comme plane. L'ombre, en particulier, devient un des éléments fondamentaux de l'analyse d'image et il est des cas où son analyse définit mieux les objets que les objets eux-mêmes.

2) La dimension verticale de ces objets perturbe la vision : une image avec visée oblique aura des pixels « façade de bâtiments », la parallaxe va déformer la vision des objets épais, ou verticaux.

3) La règle de base des méthodes de classification automatique d'image devient caduque : alors que l'on supposait une bijection entre radiométrie et objet, les objets d'étude sont trop petits pour utiliser ces méthodes. C'est la variabilité interne des objets d'intérêt qui devient primordiale : la caractérisation d'un objet en bloc par utilisation directe de la signature spectrale (radiométrie) est remplacée par l'analyse des formes et de l'arrangement des éléments internes. Les méthodes de classification radiométriques automatiques, inopérantes, sont pour le moment remplacées par des techniques moins automatisées plus proches de la photo-interprétation. Une plus grande automatisation de l'interprétation des images à THRS constitue un nouvel enjeu pour la recherche en traitement d'image.

À l'inverse, dans la partie aléa ci-dessous, nous proposons une approche interne à la zone inondée pour extraire des informations originales et accéder à une connaissance des niveaux d'eau.

Les deux réflexions présentées ici sont issues d'études menées par l'UMR3S Cemagref/Engref, Montpellier sur l'analyse du risque d'inondation, études financées dans le cadre du programme ASS 2000 (actions scientifiques structurantes). Ces deux études sont complémentaires, dans la mesure où l'une s'est intéressée à la caractérisation des enjeux vulnérables à partir d'images THRS (Adam, 2001), tandis que l'autre a porté sur le phénomène de crue, l'aléa (Raclot *et al.*, 2001 ; Mouquet, 2001).

Caractérisation des enjeux par THRS

Un état des lieux des démarches de gestion du risque d'inondation fait apparaître une multiplicité d'acteurs, d'objectifs et de procédures associées. Les acteurs apparaissent à différents niveaux d'intervention, du niveau national (agences de l'eau, ministères) en passant par les niveaux région et département (DIREN, DRAF, agence de bassin, DDE, DDAF, préfectures, Sécurité civile....), jusqu'au niveau local (communes, syndicat intercommunal…) ainsi que des acteurs transversaux tels que les compagnies d'assurance.

Les procédures de gestion des zones inondables sont présentées dans le tableau 1 en fonction des objectifs (prévention, protection, gestion de crise et post-crise). L'analyse des besoins en terme d'identification des enjeux utiles au calcul de la vulnérabilité dépend donc fortement du contexte de gestion. Cela conduit à une multitude de caractérisations souhaitées, et donc à des échelles et à des objets très variables. Leur caractérisation par télédétection nécessite de mobiliser des images de différentes résolutions, aussi bien spatiales, spectrales que temporelles.

Une nomenclature à 3 niveaux

À la suite de l'analyse de ces besoins et de différents cas d'étude, on a construit une nomenclature en 3 niveaux (tableau 2) qui représente un compromis entre la diversité des besoins et la recherche d'une nomenclature peu complexe (F. Adam, 2001).

Le niveau 1 est assez global et différencie essentiellement l'urbain, le rural et les zones en eau.

Le niveau 2 est une caractérisation plus fine spatialement et plus détaillée sémantiquement. Il représente plutôt l'échelle du quartier et est constitué de thèmes tels que l'urbain continu, l'urbain discontinu, les zones agricoles, les zones naturelles, les infrastructures de grande taille (port de plaisance, hippodrome)…

Le niveau 3 est encore plus précis : il concerne plutôt l'habitat individuel et les objets ponctuels tels que les piscines, les stations d'épuration, les industries… À l'intérieur de ce 3e niveau, deux degrés de spécialisation sémantique ont été définis :

3.1) les caractéristiques visibles depuis l'espace, par exemple le nombre d'étages,

3.2) les caractéristiques non visibles depuis l'espace, par exemple la hauteur du plancher.

Les deux premiers niveaux (1 et 2) correspondent à des procédures de type SAGE (Schéma d'aménagement et de gestion des eaux) ou PI (Plan d'intervention) au niveau régional, départemental et intercommunal, alors que le niveau 3 est requis par des procédures de type assurances, PIC (Plan d'intervention communal) ou PPR (Plan de prévention des risques).

Acteurs	Objectifs	Procédures
- Services d'administration centrale - Coordinations régionales - Services départementaux - Acteurs locaux - Compagnies d'assurance	- Prévention	Planification : le SAGE Réglementation du PLU : le PPRIn (plan de prévention des risques d'inondation)
	- Protection	Plan de vigilance Annonce de crue
	- Gestion de crise et post-crise	Organisation des secours : Plan d'intervention (PI) Système d'indemnisation

Tableau 1 – Gestion du risque d'inondation : acteurs, objectifs et procédures.

Tableau 2 – Les 3 niveaux de nomenclature d'occupation du sol adaptée à la vulnérabilité au risque d'inondation.

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	
- Urbain - Rural - Zone en eau	- Urbain continu - Urbain discontinu - Zones agricoles - Zones naturelles - Infrastructures de grande taille (port de plaisance, hippodrome...)	- Habitat individuel (pavillon) - Habitat collectif (immeuble) - Occupation du sol à la parcelle - Objets (industrie, gare, hôpital, STEP, piscine, école...)	
		Niveau de Spécialisation 3.1 *Nb d'étages*	Niveau de Spécialisation 3.2 *cote plancher, installation électrique*

SAGE . PI — Assurances, PIC

Par la suite, nous nous intéresserons uniquement aux niveaux 1, 2 et 3.1 (niveau 3, degré 1 de spécialisation), les seuls pouvant être traités par télédétection spatiale.

Les bases de données environnementales existantes

Avant d'étudier le potentiel de la télédétection pour la caractérisation de la vulnérabilité, un premier travail a porté sur la disponibilité et la pertinence des bases de données (BD) existantes, notamment des bases environnementales. L'encadré 2 recense et décrit quelques bases de données existantes en France.

La méthode a consisté à analyser l'adéquation des principales BD intéressantes et en fonction des 3 niveaux de nomenclature identifiés (tableau 3).

Les BD de type Corine land Cover®, Spot thema®, et BD Carto® se sont avérées pertinentes pour les niveaux 1 et 2.

Au niveau 3, les BD telles que les plans cadastraux informatisés (PCI), les Scan25® ou la BD Topo® de l'IGN sont particulièrement adaptées pour la caractérisation cartographique des enjeux. Certaines bases spécialisées en agriculture (ex : RGA), sur les routes (ex : GéorouteV2®), sur les sites industriels dangereux (ex : base SEVESO), sur les adresses (ex : AddressMap® et Map5000)… permettent même l'accès aux niveaux 3.1 et 3.2 de spécialisation de ces enjeux.

Tableau 3 – Adéquation entre les BD existantes et les niveaux proposés.

Niveau 1 et 2	Niveau 3
Corine Land Cover® Spot Thema® BDCarto®	PCI BD Topo® Scan25® Scan ville®
	BD de spécialisation : AddressMap® et Map5000 Iris-2000® SEVESO RGA GéorouteV2®

L'analyse fine du contenu de ces bases révèle que leur usage combiné permet de couvrir la quasi-totalité des enjeux, et ce dans les 3 niveaux identifiés (Adam, 2001).

Cependant la plupart des bases de données prises une à une présente un ou plusieurs des problèmes suivants :

1) mise à jour obsolète ;

2) incomplétude dans la couverture spatiale ;

3) difficulté d'accès à l'information (coût, format, autorisation…) ;

4) incompatibilité avec les autres bases de données.

Le principal intérêt de la télédétection est de pouvoir combler certaines de ces lacunes.

Utilisation des données de télédétection et place que peuvent avoir les images THRS

Le potentiel de discrimination des images de télédétection peut être facilement présenté en fonction des trois types de résolution : spectrale, temporelle et spatiale. Pour étayer ces propos, un jeu test d'images multi-capteurs, multi-résolutions a été analysé sur la zone péri-urbaine de Montpellier (Adam, 2001).

Encadré 2

Quelques bases de données existantes en France.

Thématique	Nom	Description
Occupation du sol	Corine Land Cover	BD vectorielle d'occupation du sol (Europe), gérée pour la partie française par l'Institut français de l'Environnement ; établie par interprétation d'images de télédétection ; échelle 1/100 000 (surface minimum = 25 ha), hiérarchisée en trois niveaux et 44 postes, mise à jour décennale.
	SPOT Thema®	BD vectorielle d'occupation du sol de la société SPOT (France métropolitaine), qui précise la BD Corine Land Cover ; du 1/50 000 (8 postes) au 1/25 000 (29 postes).
Base cartographique	BD Carto®	BD vectorielle généraliste (voies de communication, hydrographie, équipement, unités administratives…) de l'IGN ; échelle en 7 thèmes, du 1/50 000 au 1/250 000, mise à jour annuelle sur France métropolitaine.
	SCAN®	BD images de l'IGN pour France métropolitaine : du SCAN25® (1/25 000) au SCAN1000® (1/1 000 000) + pour quelques villes françaises : SCAN Ville® jusqu'à 1/25, mise à jour : 4-5 ans.
	PCI	BD Image ou vectorielle de la DGI, du 1/500 au 1/5 000.
	BD Topo®	BD vectorielle généraliste (routes, hydrographie, bâtiments, relief…) de l'IGN ; échelle en 10 thèmes et 160 postes, du 1/50 000 au 1/250 000.
Routes et Habitat	Address-Map® et Map5000	BD vectorielle de géocodage par adresse de la société Claritas ; échelle de la rue ; mise à jour permanente ; communes › 5 000 hab.
	Géoroute®	Base de données vectorielle de l' IGN avec voirie et géocodage par adresses ; mise à jour : 6 mois à 2 ans ; concerne les routes de France et adresses de 400 agglomérations › 10 000 hab.
	Iris-2000®	BD vectorielle de l'INSEE « Îlots regroupés pour l'information statistique » qui récupère les données du RGP (Recensement Général de Population) ; échelle du quartier ; mise à jour décennale pour le RGP ; concerne les communes › 10 000 hab. + certaines › 5 000 hab.
Activités industrielles et agricoles	SEVESO	BD de l'État (DRIRE) localisant 700 sites d'activités industrielles considérées comme dangereuses en France ; localisation au 1/25 000 ; 5 grands thèmes.
	RGA (Recensement général agricole)	Base de données d'Agreste (service statistique du ministère de l'Agriculture) sur l'ensemble des unités de production, reliée à l'adresse du siège d'exploitation ; 5 thèmes (culture, élevage, bâtiment…) ; mise à jour pluriannuelle.
Le RGE : Référentiel géographique à grande échelle		Produit IGN, le RGE est constitué de données : – ortho-photographiques (BD ORTHO®), (photographie aérienne couleur, prise au 25 000ᵉ, scannée et orthorectifiée, livrée à une résolution spatiale de 50 cm) ; – topographiques (BD TOPO®) ; – parcellaires cadastral, géoréférencées et assemblées (BD PARCELLAIRE) ; – d'adressage localisé (BD ADRESSE). Travail en cours : couverture totale du territoire par l'ortho-photographie et la topographie numérique prévue en 2006 ; données parcellaires et adressage disponibles en 2007.
Futur référentiel adresse unique (AFIGéo, 1999)		Actuellement, il y a un pourparler entre différents partenaires (IGN, INSEE, DGI et La Poste) pour créer un unique référentiel adresse, homogène sur tout le territoire avec une mise à jour performante.

Si l'on considère la résolution spectrale, il existe une grande variété de capteurs.

L'utilisation du multi-spectral augmente les capacités de discrimination des différents thèmes d'occupation du sol, par exemple l'existence de valeurs radiométriques faibles dans le canal rouge et fortes dans le canal proche infrarouge est un bon indicateur de la présence de végétation à forte activité chlorophyllienne.

En terme de résolution temporelle, plusieurs images prises à des dates différentes améliorent en général la discrimination entre les différents types d'occupation du sol. En effet, les caractéristiques biophysiques et/ou structurales de la plupart des objets à la surface de la Terre évoluent au cours du temps selon des cycles qui leur sont propres : leurs réponses spectrales varient en conséquence. Un choix raisonné de plusieurs dates de prises de vue augmente donc les chances des distinguer des classes d'objets entre elles. L'image de gauche de la figure 1 correspond à une composition colorée de trois indices de végétation issue de 3 images SPOT XS de dates différentes à l'intérieur d'une même saison culturale. Ce type d'image se prête bien à une caractérisation automatique de l'occupation du sol par classification numérique (image de droite de la figure 1).

En ce qui concerne la résolution spatiale, qui reste le point focal de cette étude, les questions portent sur le potentiel des nouvelles images disponibles. Il y a peu, les données civiles d'observation de la Terre les plus précises étaient des images à résolution décamétrique, par exemple SPOT (panchromatique à 10 m ou multispectral XS à 20 m) ou LANDSAT Thematic Mapper (panchromatique à 15 m et multispectral à 30 m). Ces images sont qualifiées actuellement de **MRS** (Moyenne Résolution Spatiale) car désormais il faut intégrer des images beaucoup plus fines, à résolution métrique : les images de **THRS** (Très Haute Résolution Spatiale, encadré 1, *p. 84*). L'analyse du jeu de données test sur Montpellier (figure 2 présentant 3 images de la même zone avec des résolutions spatiales allant de 1 m à 20 m) a permis de confirmer que l'on arrive à

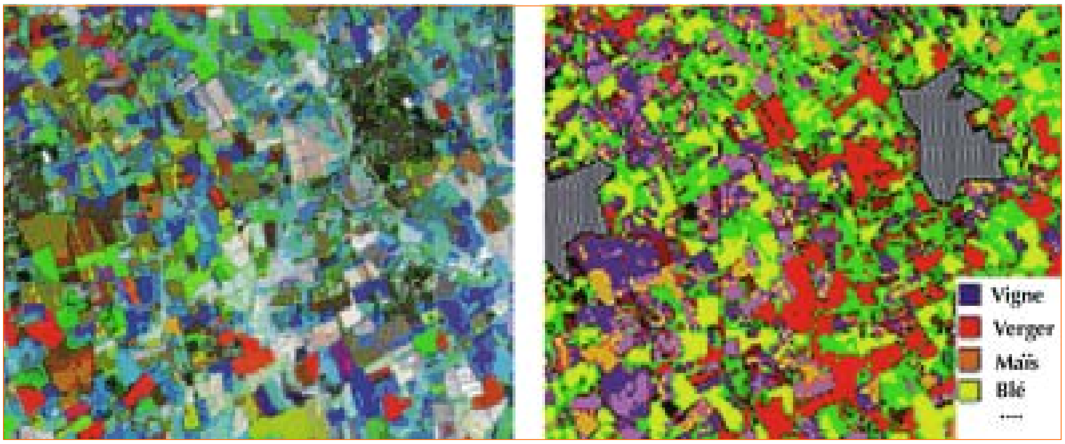


Figure 1 – Exemple de classification automatique à partir d'images SPOT XS.
À gauche : image composite d'indices de végétation issue de 3 images SPOT XS de dates différentes.
À droite : image classée.



Figures 2 et 3 – Résolutions spatiales, de la THRS à la MRS.

extraire à partir d'images MRS la majorité des thèmes des niveaux 1 et 2. Mais ces images MRS deviennent insuffisantes pour accéder à la caractérisation du niveau 3, où seules les images de type THRS sont efficaces en permettant par exemple l'individualisation des objets de type bâti. Par contre, des problèmes de coût, de stockage et de temps de calcul apparaissent pour la THRS. L'emprise géographique au sol des images à THRS étant également plus petite que pour les images à MRS (sauf pour les images des satellites SPOT 5 dont l'emprise reste de 60 x 60 km mais avec une résolution pouvant atteindre 2,5 m), la couverture exhaustive de grandes zones devient également plus contraignante.

Enfin les traitements automatiques existants basés sur des classifications par pixel, adaptés à la MRS, ne sont pas fonctionnels avec la THRS. Pour cette dernière, la seule technique opérationnelle reste la photo-interprétation, éventuellement assistée par ordinateur, mais la tendance nouvelle est l'émergence de techniques automatiques de détection par objets. Le tableau 4 récapitule de manière qualitative les atouts et limites respectifs des images MRS et THRS en termes de possibilités de discrimination (résolution, emprise géographique) et de facilité d'utilisation (coût, stockage, automatisation).

	Résolution spatiale	Coût et stockage	Emprise géographique	Automatisation traitement
THRS	+++	-	+	-
MRS	+	++	++	++

Tableau 4 – Avantages et inconvénients des modes THRS et MRS.

Exemples de traitement automatique dans le cas d'images MRS

Parmi les traitements automatiques existants en MRS, la classification supervisée pixel à pixel est une des techniques les plus utilisées. Elle permet de passer d'une ou plusieurs images brutes de télédétection à une nouvelle image classée selon une certaine nomenclature (figure 1). Une autre technique éprouvée en traitement automatique est basée sur l'analyse de texture et l'utilisation de la morphologie mathématique et permet par exemple d'extraire assez facilement des zones urbaines (CAP-GEMINI, 1992) (figure 3).

En conclusion sur l'apport potentiel de la THRS pour caractériser les enjeux

La THRS permet un accès au niveau 3 de la nomenclature ce qui n'était pas possible avec les données « classiques » de télédétection à MRS. Mais compte tenu des contraintes abordées précédemment, l'emploi de ce type de données ne peut être systématisé à toutes les procédures ; il doit être ciblé en fonction des besoins et utilisé seulement en complément des bases de données existantes. Une des questions est de savoir si l'on va utiliser des images en THRS ou en MRS (encadré 1) ?

Sur la base des éléments présentés dans le tableau 4, les images à MRS interprétées automatiquement apparaissent suffisantes pour la plupart des enjeux en zone rurale et pour les enjeux globaux en zone urbaine (enveloppe des villes, découpage selon la densité du bâti). La THRS apparaît intéressante par rapport à la MRS seulement pour accéder au niveau 3.1, notamment en milieu urbain et péri-urbain où les enjeux sont plus élevés avec une évolution temporelle rapide. Son intérêt est plus marginal



Figure 3 – Extraction automatique de zones urbaines sur image MRS par traitements texturaux et morphologiques. À gauche : SPOT XS1 ; à droite : extraction résultante.

en zone rurale car l'utilité des nouvelles informations obtenues (habitat isolé, serres, maraîchage) est à mettre en balance avec la lourdeur des moyens à mobiliser.

On retrouve ici des idées de « résolution optimale » (Marceau *et al.*, 1994) qui insistent sur le fait que la résolution la plus fine n'est pas toujours la plus appropriée. Pour un objet donné, sa caractérisation sur des images de télédétection doit se baser sur un compromis entre les divers critères décrits au tableau 4, *p. 89*.

Les perspectives : on assiste actuellement à la mise en place d'un référentiel à grande échelle (RGE) basé en partie sur des photographies couleur à résolution 0,5 m sur toute la France, avec une mise à jour tous les 5 ans. Comme autres perspectives, signalons des pourparlers entre la DGI, la poste, l'IGN et l'INSEE pour l'établissement d'un référentiel adresses unique sur la France, homogène, exhaustif et régulièrement mis à jour. Un tel référentiel permettrait de géoréférencer finement de nombreuses données alphanumériques, notamment celles de l'INSEE (encadré 2, *p. 87*).

Analyse de l'aléa à partir de photos aériennes

L'étude relative à l'analyse de l'aléa vise à la valorisation de photos aériennes sur une plaine inondée pour déterminer le niveau d'eau en tout point à l'instant de la prise de vue.

Objectif et critères de qualité

L'objectif est d'estimer des hauteurs d'eau directement à partir d'une série de photos aériennes afin d'aider à la compréhension des inondations, à la structuration du champ d'inondation, à la construction de la modélisation elle-même ou au contrôle de sa validité.

En lien avec les modélisations hydrauliques, la précision requise sur les estimations de hauteur d'eau est de l'ordre du décimètre en lit majeur (pour le lit mineur la qualité requise est plus fine, mais elle ne rentre pas dans l'analyse proposée ici).

Il faut remarquer que l'un des écueils dans l'estimation des hauteurs d'eau vient de la qualité de la base de données topographique : dans le cas de l'Hérault, on a pu comparer plusieurs bases topographiques entre elles (points cotés issus de photogrammétrie) et les comparer à une référence précise issue de campagnes GPS différentiel haute définition. Le résultat est décevant : les bases de points cotés censées être de précision « parfaite » sont disparates avec des écarts locaux pouvant atteindre 50 cm voire 80 cm, du fait probablement d'une mise en œuvre trop imprécise des techniques de stéréoscopie.

Dans ces conditions, vouloir obtenir une hauteur d'eau calculée à 10 cm près sur la plaine n'est pas envisageable : une estimation moyenne autour de 20 cm est certainement l'objectif optimal à atteindre.

Le schéma utilisé ne fait, contrairement aux modélisations, aucune hypothèse hydraulique : ni frottements, ni état de digue, puisqu'on ne fait que constater le niveau d'eau atteint.

On définit en fait la crue par une méthode inverse : on part des résultats de débordements sur la plaine inondée observée à l'instant de la prise de vue pour en déduire les hypothèses du fonction-nement ou valider les hypothèses proposées.

Pour atteindre cet objectif, on a mis en œuvre une méthode qui relève de 4 domaines scientifiques :

1) la télédétection, pour l'analyse et la valorisation des photos aériennes ;

2) les SIG, pour le stockage et la gestion de toutes les données géoréférencées ;

3) l'hydraulique, pour le découpage en compartiments de calcul et la mise en cohérence des observations ;

4) l'IA (intelligence artificielle), pour la constitution d'un système de contraintes sur les niveaux d'eau, intra et inter-compartiments et leur solution numérique optimale.

Les données utilisées sont celles des photos aériennes de la crue (données fondamentales sur le phénomène) complétées par la connaissance de la plaine hors crue en topographie et en occupation du sol (référence cartographique).

La méthode

La méthode de passage d'une vision verticale à des hauteurs et niveaux d'eau a fait l'objet de plusieurs articles dont une présentation axée sur les aspects hydrauliques (Raclot et Puech, 1998) et une autre qui détaille les aspects de résolution du système de contraintes et d'optimisation numérique de la solution (Raclot et Puech, 2001). Bien que de nombreuses améliorations aient été apportées depuis 1998, les bases restent inchangées et nous les rappellerons succinctement, laissant au lecteur le soin de revenir aux articles cités.

La méthode repose sur l'axiome que les photos aériennes (ou imagerie satellite THRS) contiennent une quantité considérable d'informations sur la plaine inondée, sous une forme qualitative ou semi-qualitative, chacune faiblement informative, et qu'une valorisation efficace passe par le rassemblement de l'ensemble de ces données dans un même traitement.

On est dans le cas d'un observateur lointain d'une plaine inondée, qui d'un coup d'œil embrassant le paysage inondé, se fait une représentation fine du phénomène inondant, car il associe dans une même analyse les lignes de courants, les bords d'inondation ainsi que les objets totalement ou partiellement inondés. C'est ce que nous cherchons à faire ici à l'aide de techniques numériques, en mélangeant de nombreuses données disparates et de qualité variable dans une même analyse globale.

Pour aider à cette mise en cohérence, la plaine est décomposée en compartiments hydrauliques connectés, chaque compartiment étant supposé de niveau unique et se déversant vers les compartiments voisins plus bas (schéma de « casiers hydrauliques ») (figure 4).

Les images ou photos aériennes en crue nous renseignent sur 3 types d'informations, qui peuvent être incomplètes ou imprécises :

– des informations sur la structuration en compartiments hydrauliques, basées sur les limites naturelles de la plaine (digues, haies, routes…) ;

– des informations de niveau d'eau par compartiment (par recoupement de limites inondées avec un ensemble de points cotés ou d'objets semi-submergés dont on connaît la hauteur) ;

– des informations sur les directions de circulation des eaux entre compartiments, classés en flux ou équilibres hydrauliques, obtenus directement sur image (courants, digues rompues...) et complétés par connaissance terrain ou relevés de terrain post-crue.

L'étape 1 (la plus longue et délicate) est la constitution de la base de données du SIG qui contient toutes les informations de base, indépendantes de la crue : altitude du terrain naturel, structures linéaires de la plaine en compartiments (digues, routes, rivière), occupation du sol, etc.

L'étape 2 concerne le recueil des particularités de la crue analysée : à partir d'une série de photos aériennes, verticales ou obliques, prises pendant la crue, on renseigne les compartiments en informations sur les hauteurs d'eau par des estimations majorantes ou minorantes de la valeur recherchée, ainsi que des liens hydrauliques avec les compartiments voisins (circulation de i vers j).

Chacune de ces informations peut se ramener à des inégalités linéaires. On établit ainsi 2 inégalités relatives au niveau d'eau de chaque compartiment, 2 inégalités par flux et 4 inégalités en cas d'équilibre entre compartiments voisins (Raclot et Puech, 1999). L'ensemble de ces inégalités linéaires compose un système de contraintes sur les niveaux d'eau.

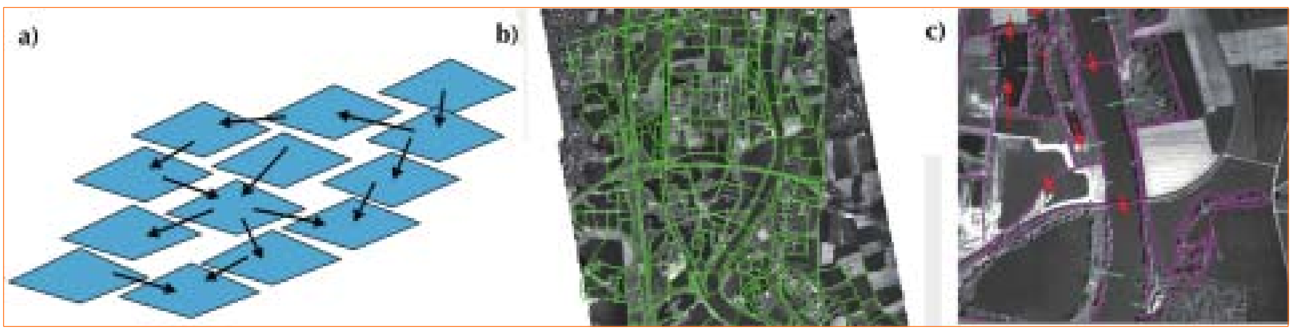


Figure 4 – Organisation spatiale de la méthode : a) compartiments théoriques et flux ; b) et c) compartiments réels et flux (Moselle).

L'étape 3 est la résolution numérique du système de contraintes. Cette étape est entièrement automatisée et se déroule comme suit :

1) le contrôle, l'analyse et la vérification de cohérence intra compartiments. On en déduit une première estimation de la plage de niveaux possibles (Min, Max), avec un degré de confiance (inégalités de type minorant, majorant) ;

2) le contrôle du chaînage hydraulique : on vérifie qu'il n'y a pas de circulations incompatibles ;

3) la transformation des flux et équilibres en contraintes entre niveaux de compartiments voisins ;

4) le contrôle de cohérence inter-compartiments quand on combine niveaux locaux et directions d'écoulement : il y a au moins une solution possible entre les compartiments successifs, (i.e , le système de contraintes a au moins une plage de solutions) ;

5) l'obtention de la solution optimale : resserrement des estimations pour obtenir une plage [min, max] optimale dans chaque compartiment.

Le schéma de résolution des contraintes de flux est basé sur un système de double-balayage amont-aval (gérant les contraintes sur les maxima) puis aval-amont (pour les contraintes sur les minima). Une amélioration de l'algorithme a été proposée par Wilson (Wilson, 2001) dans le cadre du programme européen REVIGIS, ce qui nous a conduit à une solution complète selon un double balayage par secteurs qui permet de gérer non seulement les flux mais aussi les équilibres hydrauliques (niveaux d'eau quasi identiques et direction de flux incertaine) (Raclot et Puech, 2001).

Applications et précisions obtenues

Cette méthode a été appliquée sur des plaines diverses :

– Hérault, à partir de photos verticales pour une crue rapide sur une plaine très structurée, et un champ d'inondation très large (Raclot et Puech, 1999) ;

– Aisne, photos obliques, crue lente et plaine peu structurée, mais doublée de canaux (Puech *et al.*, 2000) ;

– Moselle, conditions proches de l'Aisne, estimations effectuées pour 2 dates d'inondations (Mouquet, 2001).

La qualité d'estimation des résultats est apparue, dans tous les cas, proche de 20 cm pour la demi-amplitude moyenne entre les valeurs minorantes et majorantes de l'estimation, ce qui représente une valeur par excès de l'erreur réelle et qui place ces résultats dans les spécificités de qualité compatibles avec l'hydraulique du champ d'inondation (tableau 5). Il faut rappeler que cette méthode est, contrairement aux modèles de simulation, entièrement exempte d'hypothèses de fonctionnement (coefficient de frottement, rupture de digue…).

Une base SIG d'archives facilement consultable

Une retombée intéressante concerne la création d'une base de données de référence sur les crues observées, aisément consultable au sein d'un SIG et incluant :

– le type de crue et son contexte : fréquence du phénomène (décennale, par exemple), décalage temporel entre l'instant de prise de vue et le pic de crue ;

– la série de clichés aériens repérés par leur emprise au sol ;

– les limites de débordement et les compartiments touchés par la crue ;

– le niveau d'eau dans chaque compartiment inondé (avec son incertitude) ;

– la hauteur d'eau estimée à l'aplomb de tout point coté (avec son incertitude).

La figure 5 illustre sur la Moselle les possibilités de cette base. Cette procédure est une valorisation d'archives mixtes : hauteurs-photos. Le SIG rend ces données disponibles à tout moment et en particulier en période de risque de crue. On peut interroger immédiatement la base pour connaître l'état lors d'une crue de même ampleur que celle redoutée : les photos indiquent sous forme analogique les routes coupées et les terres inondées, tandis que les valeurs de cotes et hauteurs d'eau attachées aux compartiments et points cotés renforcent considérablement l'intérêt de la base SIG.

Tableau 5 – Volume de données et précision des résultats ; Moselle, crue de mai 1983.

	NOMBRE
Compartiments	156
Contraintes	496
Points cotés	3063
Demi Amplitude Moyenne (Max - Min)/2	± 22 cm

Mise en route opérationnelle

Une des difficultés pour une mise en route opérationnelle de cette méthode est la disponibilité de photos de crue à un instant proche du pic de crue. À l'heure actuelle, il existe rarement des prises de vues systématiques en crue.

Le point le plus fastidieux et long est la phase préparatoire hors crue : mise en oeuvre de la base SIG, recueil de points cotés et de références fiables et complètes sur l'altitude et l'occupation du sol. Le recueil de photos en crue est quant à lui d'un coût marginal par rapport aux dommages causés par l'inondation et nous avons pu montrer que tout type d'image pouvait être valorisé : photo verticale ou oblique ; N&B, couleur ou IRC (Infrarouge couleur); prise de vue par avion muni de trappe (Hérault), avion d'aéroclub (Moselle) ou même ULM (Aisne).

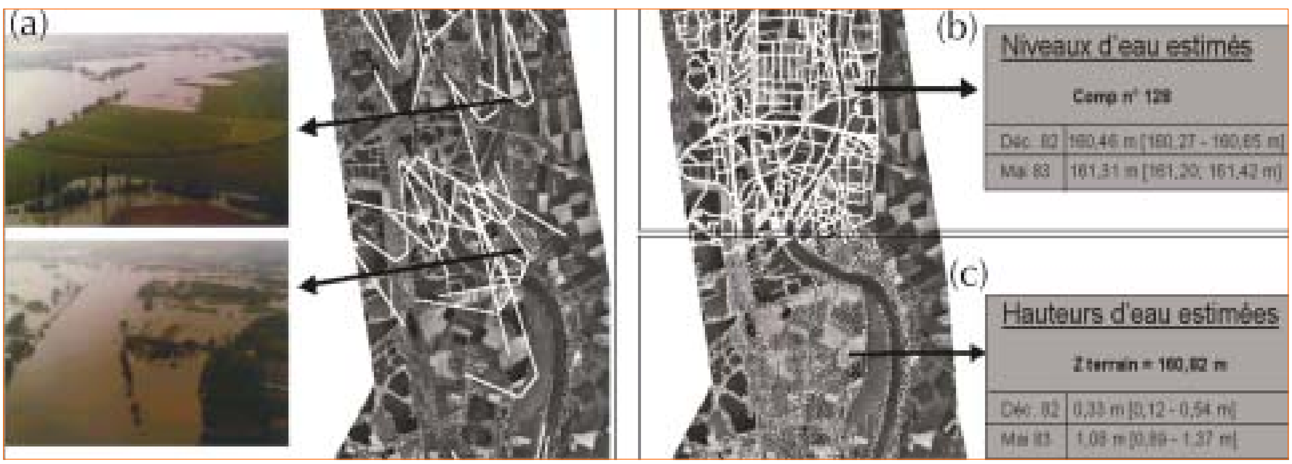
Mais il faut organiser ce recueil : les crues sont des phénomènes rapides et fugitifs. Le recueil des données doit se faire à un instant proche du pic de crue. Selon les climats et la rapidité des phénomènes, le temps de décider du vol, de contacter une société de service, de débloquer les fonds… et toutes les traces d'eau ont disparu. Ainsi en novembre 1999, dans les inondations dites « du grand Sud » (Aude, Hérault, Tarn), la prise de vue systématique des zones inondées a commencé 10 jours après le pic de crue ! Autrement dit, l'eau avait eu le temps de se retirer. Il faut donc organiser à l'avance ces missions de prise de vue avant le phénomène (enveloppe financière, type de prestation, autorisations de vol). Il faut aussi veiller à suivre un certain nombre de consignes : une vue régulière de tout le secteur inondé, en favorisant le systématisme et la continuité plutôt que des « photos sensationnelles » qui n'ont qu'une valeur esthétique ou journalistique.

Conclusion

Le potentiel opérationnel offert par les images de télédétection satellitaire pour les projets de gestion s'accroît avec l'arrivée des données à très haute résolution spatiale (THRS). Le gain est d'autant plus fort que les objets visibles sur ces nouvelles images ont directement un intérêt pour le gestionnaire : bâtiments, voies de communication, digues…

Dans cet article, deux exemples illustrent l'apport nouveau de ces images dans le cadre des deux composantes du risque d'inondation, à savoir la vulnérabilité et l'aléa. Dans le cas de la vulnérabilité, les objets utiles à la gestion ont été classés en trois niveaux d'observation : l'intérêt des images THRS apparaît fortement pour les éléments fins de type habitat individuel et objets ponctuels tels que piscines, stations d'épuration, industries…

Les informations sur ces images sont bien entendu incomplètes (certains degrés de spécialisation ne peuvent être obtenus, par exemple le nombre d'étages par vue verticale). Aussi ces données prennent toute leur valorisation en complément d'autres informations : bases de données géographiques existantes, images à moyenne résolution, relevés sur le terrain.



▼ Figure 5 – Base opérationnelle : une mosaïque de photographies aériennes verticales sur laquelle viennent se rajouter pour chaque crue étudiée : a) une empreinte de photos obliques par crue étudiée — et les photos en ligne ; b) la structuration en compartiments — et les niveaux d'eau atteints (avec incertitude) ; c) le champ de points cotés — et l'estimation des hauteurs d'eau (avec incertitude).

L'aléa inondation est présenté à travers une utilisation originale de photographies aériennes en crue pour définir la hauteur d'eau en tout point inondé. On établit par mélange de données en crue et hors crue une estimation des niveaux, rendue cohérente par une organisation en système de contraintes. Ceci constitue une valorisation quantitative d'archives photos sous SIG, la méthode pouvant, à terme, être adaptée à l'utilisation d'images satellitaires THRS.

Sans révolutionner la gestion des zones inondées, les images THRS peuvent désormais apporter une connaissance pertinente, systématique, répétitive et objective. Mais de nouvelles méthodes doivent être développées pour l'exploitation de ces images car les nouvelles résolutions ne tolèrent plus les traitements automatiques valables avec les images à moyenne ou basse résolution.
❐

Encadré 3

Satellites et capteurs pour l'observation de la Terre selon les 3 résolutions : spatiale, spectrale et temporelle

SATELLITES	CAPTEURS	R TEMPORELLE	R SPECTRALE	R SPATIALE
NOAA	AVHRR	12h	5 bandes	1 à 4 km
ORBVIEW 2	MS	1j	8 bandes : 0.42-0.88	1 km
MODIS EOS	Am	1-2 j	36 bandes 0.4-14.4	250, 500, 1000m
ERS 1-2 3	ATSR	35j		1 km
LANDSAT 4-5-7	TM	18j	6 [0.45,2.35] + [1 IR : 10.4- 12.5],	30 m +120 m
LANDSAT 4-5-7	MSS	18j	0.5-1.1	80m
SPOT 1-3	HRV : Pan / XS	3-26j	1 Pan 0.51-0.73 / 3 XS: 0.52-0.9	10 m - 20 m
SPOT 4	HRV :	3-26j	Pan : 0.59-0.75, MS : 0.5-0.89, MIR : 1.58-1.75, Végétation	10 m, 20 m, 20 m, 1 km
SPOT 5	HRS, HRG, MS MIR Végétation 2:	3-26j	Pan : 0.49-0.69, MIR : 1.58-1.75, MS : 0.43-0.89, 1.58-1.75	10 m, 2.5-5 m, 10m 20 m 1 km
COSMOS	TK 350	10j		10 m
JERS 1	OPS /SWIR, SAR	44j	4 OPS (0.52-0.86) + 5 SWIR (1.6-2.40) SAR : Bande L	18 m
RADARSAT	OPS SWIR, SAR	1,5-24j		8,25,30,100 m
TERRA EOS	ASTER	5-16j	3 PIR + 6 MIR + 5 IRT	15m, 30m, 90m
ERS1-2	ATSR, AMI	3-35j	ATSR : 1.6-,12, AMI-AR : Bande C	1km, 10-30m
ALOS 1	PALSAR, PRISM, AVNIR	45j	PALSAR, PRISM , AVNIR	10 m, 2,5 m, 10 m
IRS 1C/1D	MSS, WIF, PAN	4-24 j	MSS, WIF, PAN	23-70m, 188m, 5.8m
IRS-P5	Pan	4-24 j	Pan : 0.5-0.9	2,5 m
IRS-P6	LISS 4	4-24 j	Pan + 3 bandes MS	5,8 m
IKONOS	Pan, MS	3,5-5j	Pan : 0.45-0.9, 4 MS : 0.45-0.88	0,8– 4 m
RESURS F	MK4 (1 caméra) KFA 1000 (2 caméras)	4j	MK4 = Pan + 3MS :0.5-0.9 KFA-1000 : N&B + 3MS : 0.4-0.8,	10m, 2-3 m 8-12m, 4-7m
COSMOS	KVR 1000	8j	KVR1000 : 0.49-0.59	2-3 m
QUICKBIRD 2	Pan, MS	1-4j	Pan : 0.45-0.9 - MS : 0.49-0.9	0,6-2,5m
ORBVIEW 3	Pan, MS	3j	Pan : 0.45-0.9 + 4 MS : 0.45-0.9	1 – 4 m
ORBVIEW 4	Pan, MS	3j	Pan : 0.45-0.9, 4 MS : 0.45-0.9, HS : 0.45-2.5	1- 4 –8 m

NB : Les grisés du tableau délimitent les trois grands types de résolution spatiale : basse, moyenne et très haute résolution.
A noter que certains satellites portent plusieurs capteurs, qui peuvent se situer dans des classes différentes.

Résumé

La télédétection à très haute résolution spatiale (THRS) apporte dans les études environnementales la vision des objets de taille humaine. Avec ces résolutions fines, les traitements d'images ne relèvent plus des classifications automatiques mais se rapportent davantage aux techniques de photo-interprétation. Deux applications du potentiel de ces données images sont présentées dans le cas du risque d'inondation. L'une concerne l'étude de la vulnérabilité : après avoir classé les enjeux soumis au risque en trois niveaux d'observation, l'intérêt des images THRS apparaît en complément des bases de données géographiques existantes et des images à moyenne résolution. L'autre caractérise l'aléa inondation, à travers une utilisation originale de photographies aériennes en période de crue pour définir la hauteur d'eau en tout point inondé. Ceci constitue une valorisation quantitative d'archives de photographies sous SIG, la méthode pouvant, à terme, être adaptée à l'utilisation de données THRS satellitaires.

Abstract

The very high spatial resolution (VHSR) aerial or satellite images contribute to environmental studies providing the vision of human size features. To process these thin resolution images, the most efficient approaches are not based on automatic classification any more but on computer assisted photointerpration. This paper presents two applications which illustrate the potential of these images in the case of flood risk. The first one is related to the vulnerability : the useful objects for management are first classified into 3 hierarchical levels, in order to better compare the interest of VHRS images with the existing geographical data bases and the intermediate resolution images. The second one deals with the characterization of the flood phenomenon through an original use of aerial photographs to obtain the water height for any flooded point. That constitutes a quantitative valorization under GIS of aerial photographs archives and soon, of VHSR satellite images.

Bibliographie

AFIGéo, (page consultée le 09/07/2001), *Le Référentiel Adresse : États des lieux et perspectives,* Juin 1999 (http://www.cnig.fr/cnig/infogeo/france/études/adresse-rapport-final.pdf).

ADAM, F., 2001, *Apports de la télédétection à très haute résolution spatiale pour l'aide à la détermination de la vulnérabilité en zone inondable,* mémoire fin d'études ITA, UMR3S Cemagref/ ENGREF, Montpellier, 75 p.

APLIN, P., ATKINSON, P.-M., CURRAN, P.-J., 1997, Fine spatial resolution satellite sensors for the next decade*, International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, n° 18, p. 3873-3881.

CAP GEMINI, 1992, *Filtres : Extraction de zone urbaine. Manuel d'utilisation Multiscope Version 2.1*, section VI-4-1.

DEBAR, P., DESGRANGES, P., GAZULL, L. *et al.*, 1994, Une approche originale à l'échelle de la région Ile-de-France : cartographie et calcul économique des dommages des crues historiques, *in Crues et inondations*, 23es journées de l'hydraulique, Nîmes (France), Société hydrotechnique de France, 14-15-16 sept. 1994, p. 337-342.

GILARD, O., 1998. *Les bases techniques de la méthode Inondabilité,* Ed. Cemagref, Paris, 207 p.

IRS, SIEE, 2001, *Étude globale pour une stratégie de réduction des risques d'inondation dus aux crues du Rhône — Cartographie de l'occupation du sol,* Lot N°4 de l'étude, cartographie, 48 p.

MARCEAU, D.-J., GRATTON, D.-J., FOURNIER, R.-A., FORTIN, J.-P., 1994, Remote Sensing and the Measurement of Geographical Entities in a Forested Environment, 2, *The Optimal Spatial Resolution, Remote Sens*. Environ., 49, p. 105-117.

MARINELLI, L., MICHEL, R., BEAUDOIN, A. *et al.*, 1997, Flood mapping using ERS tandem coherence image : a case study in southern France, *in 3rd ERS Symposium on Space at the service of our environment,* Florence, ITALIE, 17-21 march 1997, p. 531-536.

MATE, 2001, *Étude de faisabilité d'un observatoire des enjeux et de leur vulnérabilité aux inondations, Cahier des charges pour la consultation de bureaux d'études,* Document MATE/ DPPR/SDPRM, octobre 2001, 10 p.

MOUQUET, P., 2001, *Utilisation de photos aériennes obliques pour l'estimation de la hauteur de crue. Application au bassin versant de la Moselle,* mémoire fin d'études ENSAR, 55 p.

PUECH, C., RACLOT, BLIN, D., 2000, *Guide méthodologique : intégration des photos aériennes d'inondation dans les modèles hydrauliques. Application à la vallée de l'Aisne,* rapport d'étude UMR3S-CETMEF, 80 p.

RACLOT, D., PUECH, C., 1999, Champs d'inondation et photographies aériennes. Détermination des hauteurs de submersion, *Ingénieries EAT*, n° 17, mars 1999, p. 3-17.

RACLOT, D., MAUREL, P., PUECH, C., 2001, *Apports de la télédétection à très haute résolution spatiale à l'étude du risque d'inondation,* Colloque SIRNAT 2001 (Systèmes d'Information pour les Risques NATurels), Sophia Antipolis, 6-7 décembre 2001, 20 p.

RACLOT, D., PUECH, C., 2002, What Does AI Contribute to Hydrology? Aerial Photographs and Flood Levels, *Applied Artificial Intelligence*, vol. 17, n°1, p. 71-86.

SCOT, 2000, *Inondations sur l'Aude, le Tarn, l'Hérault et les Pyrénées-Orientales* - 12 au 14 novembre 1999 (http://www.scot-sa.com/siren/inondations_aude.htm).

SERTIT, 2000, *La Camargue, crue d'octobre 1993 ; intégration des images SPOT et ERS,* (http://sertit.u-strasbg.fr/sertit_webexpert/projets/camargue).

WILSON, N., 2002, *Reasoning with Uncertain Constraints in the Flooding Problem : Preliminary Report of the europeen project REVIGIS,* « revision in GIS », 30 p.